

Transporte Hidráulico de Mistruras Bentonita-Água em Condutos Forçados

Prof. Alberto Carlos de Melo Lima (UNAMA); Eng.º Civil; Msc. Hidráulica e Saneamento (EESC-USP).

Prof. Dr. Fazal Hussain Chaudhry; Departamento de Hidráulica e Saneamento da EESC-USP.

RESUMO: A argila bentonítica é amplamente utilizada em transporte de sólidos produzidos durante perfuração de poços. O presente trabalho teve por objetivo estudar o escoamento de misturas bentonita - água e determinar suas propriedades reológicas e parâmetros hidráulicos úteis nos projetos de instalações de recalque de misturas sólido - líquido.

Foi montando um circuito fechado de tubulações para estudar dados de perda de carga e perfis de velocidade. Realizaram-se ensaios com misturas bentonita - água sob várias concentrações, algumas transportando areia.

Observaram-se que a reologia da mistura bentonita-água é melhor descrita pela formulação de Herschell-Bulkley para fluidos não-Newtonianos. O coeficiente de atrito para descrever a perda de carga da mistura bentonita-água observada em tubulações no laboratório coloca-se entre as previsões de Tomita (1959) e Szilas et al. (1981). A variação da velocidade da mistura na seção transversal do tubo é melhor aproximada pela equação de Bogue-Metzner (1963).

SÍMBOLOS

D	- Diâmetro do tubo.	e	- Rugosidade absoluta.
Dv/dy	- Gradiente de velocidade ou taxa de deformação.	h	- Viscosidade aparente.
F	- Coeficiente de atrito.	m	- Viscosidade plástica de Bingham.
K	- Índice de consistência dos fluidos que obedecem a lei de potências.	m_{abs}	- Viscosidade absoluta.
K_{hb}	- Índice de consistência de Herschell-Bulkley.	m_c	- Viscosidade plástica de Casson.
$m_{bentonita}$	- Massa da bentonita.	n	- Viscosidade cinemática.
n	- Parâmetro reológico onde é expoente na relação entre viscosidade e gradiente de velocidade.	r	- Massa específica do fluido.
n_{hb}	- Índice de comportamento de Herschell-Bulkley.	$r_{água}$	- Massa específica da água.
$R2$	- Coeficiente de determinação.	$r_{mistura}$	- Massa específica da mistura de bentonita e água.
$V_{mistura}$	- Volume da mistura de bentonita e água.	τ	- Tensão de cisalhamento.
$V_{picnômetro}$	- Volume do picnômetro.	τ_c	- Tensão cisalhante inicial de Casson.
		τ_{hb}	- Tensão de cisalhamento inicial de Herschell-Bulkley.
		τ_o	- Tensão de cisalhamento inicial.
		τ_w	- Tensão de cisalhamento na parede.

INTRODUÇÃO

Em diversos processos industriais utilizam-se condutos forçados para o transporte hidráulico de misturas de lamas, fluidos de perfuração, pastas, concreto e polímeros. Estes sistemas, semelhantes a oleodutos, estão recebendo, atualmente maior

atenção, devido aos menores custos que apresentam a médio e longo prazos em relação a outros sistemas de transportes.

Como ilustração da importância do escoamento sólido-líquido e seu campo de aplicação, a tabela 1 mostra sua diversidade e contribuição às engenharias civil, mecânica, química e de minas.

Tabela 1 - Exemplos e aplicação do transporte de misturas nas engenharias (Zandi, I., 1971).

CAMPO	EXEMPLOS	SISTEMA DE ESCOAMENTO
Transporte de água	Transporte de carvão, minério, areia, argila, cimento, peixe, cinzas, madeira cortada, etc.	Escoamento através de canais e tubos
Processos Industriais	Tinta, polpa de papel, resfriamento de reatores nucleares, propelentes de combustível sólido, etc.	Escoamento através de tubos e condutos forçados
Construção e Navegação	Dragagem e aterro	Escoamento através de tubos
Conservação e Recursos Hídricos	Erosão do Solo e Sedimentação	Escoamento através de canais
Saneamento	Sedimentação, Lodo de Esgoto, Coleta de Resíduos Sólidos.	Escoamento através de canais e tubos.

Segundo **Santana** et al. (1979), o Brasil já vem empregando esse sistema de transporte há algumas décadas, desde que pôs em operação em 1977, o maior mineroduto conhecido, transportando 12 milhões de toneladas/ano de minério de ferro a uma distância de 400 Km em tubulações de 20 polegadas de diâmetro.

Segundo **Govier & Aziz** (1972), não há relações conhecidas para determinar os perfis de velocidade de sólidos, mas métodos de aplicabilidade limitada foram propostos para determinar o perfil de velocidade da água e de concentrações de misturas sólido-líquido. A necessidade de controlar os processos que envolvem misturas sólido-líquido e de projetos que facilitem o manuseio das lamas tem

favorecido o acúmulo de muitos dados experimentais, e, em torno destes, facilitado a desenvolver correlações empíricas proveitosas ao assunto.

Visto isso, o presente trabalho almejou ampliar os conhecimentos sobre o escoamento bifásico em condutos forçados utilizando bentonita. Este material, que é uma argila, foi escolhido como material de ensaio por ter grande uso na indústria de minas, como fluido de perfuração de poços e também por possuir a característica de alterar suas propriedades reológicas com a mudança da concentração da mistura de bentonita-água, podendo ser Newtoniana ou não-Newtoniana (Cheng, 1965).

Tornou-se, também essencial, conhecer os perfis de velocidades para que se possa

caracterizar a adequação do fluido para o transporte das misturas, pois quanto mais próximo de zero chegar o gradiente de velocidade, melhor. Outra razão é a prática, segundo Nakae (1994), do conceito moderno de **energy saving**, de tendência mundial, na economia de energia para bombear, porque a perda de carga seria menor, se o gradiente de velocidade fosse baixo.

Apresentam-se a instalação-piloto de ensaios, seus componentes e os procedimentos experimentais para a determinação das propriedades reológicas da mistura de bentonita-água e os instrumentos utilizados para esse fim, além dos métodos utilizados para as medidas hidráulicas.

Faz-se uma análise dos resultados dos ensaios reológicos da mistura de bentonita-água e de bentonita-areia-água que mostram que o modelo de Herschell-Bulkley teve melhor desempenho para descrever o comportamento dessas misturas e principalmente para obtenção da viscosidade aparente.

OBJETIVOS

Este trabalho tem como principal objetivo: verificar o comportamento reológico da lama de bentonita; realizar medidas de pressão ao longo das tubulações para concentrações diversas; determinar a distribuição de velocidades num tubo com água limpa, bentonita em pó e bentonita e sólidos para algumas concentrações; determinar os coeficientes de atrito em tubos em função do número de Reynolds e comparar os perfis de velocidade e o fator de atrito obtidos experimentalmente com os calculados pelas formulações disponíveis na literatura.

ESTADO DA ARTE

A revisão da literatura sobre o tema de escoamento bifásico é desenvolvida em três partes. Apresentam-se diversas formas de

classificações que podem ser encontradas para o escoamento bifásico e como essas classificações se manifestam com a mudança da velocidade do escoamento. No item seguinte focalizam-se aspectos reológicos para elucidação do comportamento da mistura de bentonita. Posteriormente, discorre-se sobre trabalhos que tratam de fator de atrito e perfis de velocidade dentro de uma linha essencialmente semi-empírica e apresentam-se neste item os resultados dessas investigações.

Classificação do Escoamento Bifásico

Segundo Doron & Barnea (1996), uma das comuns classificações (Vocaldo & Charles, 1972; Parzonka et al, 1981) diz respeito a quatro regimes de escoamentos, que são: “escoamento homogêneo”, “escoamento heterogêneo e com deslize no fundo” e “escoamento saltitante e com camada estacionária”. Continuando Doron & Barnea (1996), relataram que Bain & Bonnington (1970) e Turian & Yuan (1977) também usaram em seu trabalho o termo “saltitação para referir-se ao escoamento que move-se no fundo. É apresentado nas figuras 1 a 4 um esquema destes tipos de escoamento.

Ainda segundo a revisão da literatura de Doron & Barnea (1996), quanto aos regimes de escoamentos, relataram que alguns investigadores usaram diferenciações bem grosseiras como por exemplo: Durand (1953) e Condolios & Chapus (1963) referiram-se a um “escoamento sem deposição” e “escoamento com deposição”. Continuando, os autores afirmaram que Brow (1991) diferenciou entre um “regime de escoamento completamente segregado, em que definiu, segundo Doron & Barnea, (1996) como sendo o regime onde todas as partículas estão presentes no fundo, mais um “regime de escoamento heterogêneo”, no qual incluiu um escoamento heterogêneo em suspensão e um no fundo.

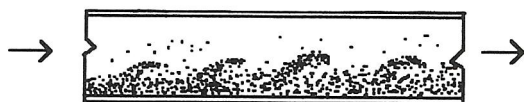


Figura 1 - Escoamento Saltitante com camada estacionária no fundo.

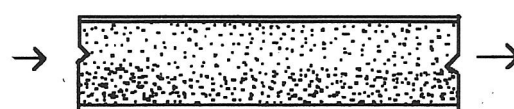


Figura 3 - Escoamento Heterogêneo.

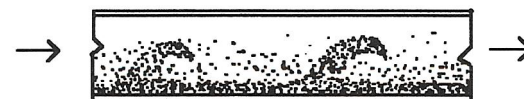


Figura 2 - Escoamento Saltitante.

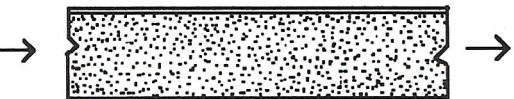


Figura 4 - Escoamento Homogêneo.

Aspectos Reológicos

Em decorrência da grande complexidade e da utilização em variadas atividades tecnológicas de um grande número de fluidos, que ao se colocarem em movimento, não apresentam constância entre a tensão aplicada e a deformação sofrida, Silva et al. (1988), verificaram a adequação do modelo de Bingham, Potência, Casson e Herschell-Bulkley ao escoamento dos fluidos à base de água e à base de óleo sob diferentes temperaturas e paralelamente, sob faixas de

deformação pré-estabelecidas, confrontaram o comportamento detectado no simulador de superfície denominado de Sistema Hidráulico de Superfície (SHS) com o obtido no viscosímetro FannVG 35A.

A tabela 2 mostra as expressões propostas para os quatro modelos estudados por Silva et. al. (1988). Cada modelo é escrito em formas equivalentes para tensão de cisalhamento (τ) ou viscosidade aparente (η): $\tau = f(dv/dy)$, $\eta = f(dv/dy)$.

Tabela 2 - Modelos reológicos mais comuns para fluidos viscosos. Silva et. al. (1988)

Modelo Reológico	Equação Reológica	Viscosidade Aparente (η)	Nomenclatura
Newton	$\tau = \mu_{abs} \cdot \frac{dv}{dy}$	$\eta = \mu_{abs}$	τ = Tensão Cisalhante μ_{abs} = Viscos. absoluta
Potência	$\tau = K \cdot \left(\frac{dv}{dy}\right)^n$	$\eta = K \cdot \left(\frac{dv}{dy}\right)^{n-1}$	K= Índice de Consistência n= Índice de Comportamento
Bingham	$\tau = \tau_0 + \mu \cdot \frac{dv}{dy}$	$\eta = \mu + \tau_0 \cdot \frac{1}{\frac{dv}{dy}}$	τ_0 = Tensão Cisalhante Inicial μ = Viscos. Plástica de Bingham
Casson	$\tau^{1/2} = \tau_c^{1/2} + \left(\mu_c \cdot \frac{dv}{dy}\right)^{1/2}$	$\eta = \left[\left(\frac{\tau_c}{\frac{dv}{dy}}\right)^{1/2} + \mu_c^{1/2} \right]^2$	τ_c = Tensão Cisalhante inicial de Casson μ_c = Viscos. plástica de Casson
Herschell-Bulkley	$\tau = \tau_{hb} + \left(K_{hb} \cdot \frac{dv}{dy}\right)^{n_{hb}}$	$\eta = \frac{\tau_{hb}}{\frac{dv}{dy}} + \left(K_{hb} \cdot \frac{dv}{dy}\right)^{n_{hb}-1}$	τ_{hb} = Tensão Cisal. Inicial de Herschell-Bulkley. K_{hb} = Índice de Consist. De Herschell-Bulkley n_{hb} = Índice de comportamento de Herschell-Bulkley

Os autores concluíram que o modelo de Herschell-Bulkley mostrou-se mais adequado que os de Casson, Bingham e aquele na forma de potência, para todos os fluidos de perfuração ensaiados no viscosímetro rotacional tipo Fann. Nos testes ensaiados no simulador SHS, adequação dos modelos de Herschell-Bulkley, da Potência e de Casson, respectivamente.

Observaram que independentemente do tipo de lama (à base de óleo ou água) e do instrumento utilizado (Fann ou SHS), em 100% dos casos analisados, o modelo de Bingham foi menos adequado para descrever o comportamento reológico dos fluidos de perfuração. A tensão cisalhante inicial do modelo de Bingham apresentou, segundo Silva et al. (1988), para todos os fluidos ensaiados, valores muito superiores aos obtidos pelas correlações de Casson e Herschell-Bulkley, confirmando a inadequação do modelo de Bingham em regiões de baixo gradientes de velocidade.

E finalizando, Silva et al. (1988) atentaram que os índices de comportamento dos fluidos ensaiados obtidos pelos modelos de potência e de Herschell-Bulkley, mostram que aqueles obtidos do primeiro modelo apresentaram em 70% dos casos, comportamento mais pseudoplástico, uma característica fortemente não-Newtoniana.

Escoamento Turbulento de Suspensões não-Newtonianas:

Perfis de Velocidade e Fator de Atrito.

Apresentam-se aqui alguns trabalhos constantes na literatura sobre formulações para o perfil de velocidade e fator de atrito. Dentro dessa linha de pesquisa essencialmente semi-empírica, mostram-se aqui os resultados dessas investigações.

Santana et al. (1984), ao estudarem o transporte de suspensões de hematita em tubos, com concentração em peso na faixa de 40 a 65%, afirmaram que o transporte de suspensões é, em sua grande maioria, no regime turbulento. E para tais suspensões concentradas de sólidos muito finos, o comportamento reológico é geralmente de fluido não-Newtoniano. Segundo esses autores, até o momento, não existe uma técnica universalmente aceita para o cálculo da queda de pressão no escoamento turbulento de fluidos não-Newtonianos. Na literatura há várias equações, obtidas pela técnica da análise dimensional, que tentam generalizar a relação entre o fator atrito e o número de Reynolds, sendo incluídas a rugosidade relativa em algumas delas. (Dodge e Metzner, 1959; Tomita, 1959; Clapp, 1961 e Szilas et al. 1981). Sendo estas equações, conforme mostra a tabela (3), analisadas pelos autores na obtenção de seus resultados experimentais e com o objetivo de correlacionar o fator de atrito em escoamento de fluidos não-Newtonianos, visando o “scale-up” no projeto de minerodutos.

Tabela 3 - Equações para o coeficiente de atrito no escoamento turbulento de fluidos que obedecem a lei de potência.

AUTORES	ANO	EQUAÇÃO
Dodge e Metzner	1959	$\frac{1}{\sqrt{f}} = \frac{2}{n^{0,75}} \cdot \log \left[\text{Re}^* \cdot \frac{f^{1-n/2}}{4} \right] - \frac{0,2}{n^{1,2}}$
Tomita	1959	$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \cdot \log \left[\text{Re}^* \cdot \sqrt{f} / 2 \right] - 0,2$
Clapp	1961	$\frac{1}{\sqrt{f}} = \frac{1,35}{n} - 1,48 + \frac{2,27}{n} \log \left[\text{Re}^* \cdot \frac{(f)^{1-n/2}}{4} \right] + 0,34 \frac{(5n-8)}{n}$
Szilas, Bobok e Navratil	1981	$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \cdot \log \left[\frac{10^{-\beta/2}}{\text{Re}^* \cdot f^{(2-n)/2n}} + \frac{\varepsilon}{3,71 \cdot D} \right]$ onde; $\beta = 1,51^{1/n} \cdot \left(\frac{0,707}{n} + 2,12 \right) - \frac{4,015}{n} - 1,057$

Desta análise **Santana et al.** (1984) concluíram que a equação de Szilas et al. (1981) apresentou melhor desempenho devido à inclusão da rugosidade relativa (ε/D) como parâmetro fundamental, a qual é importante fora da faixa (2 a 10 Centipoise). As demais equações da tabela apresentaram fraco desempenho na previsão do coeficiente de atrito das suspensões de hematita, sendo mais indicadas para a análise do escoamento de polímeros que apresentam viscosidades mais elevadas e efeitos de redução de arraste.

Massarani & Telles (1992), mostraram que as várias equações encontradas para os fluidos Newtonianos, podem ser ampliadas para contemplar uma ampla classe de fluidos não-Newtonianos, sendo o elo de ligação entre essas duas classes a viscosidade efetiva do fluido. Esta viscosidade pode ser calculada conhecendo-se a função tensão cisalhante do fluido, que é uma propriedade do fluido, e a

taxa de deformação característica, uma propriedade cinemática do escoamento. Os autores compararam as várias equações existentes para o fator de atrito em escoamentos turbulentos de fluidos não-Newtonianos em tubos (Maegava et al. 1984, Santana et al. 1983 e Szilas et al. 1981), e concluíram que o fator de atrito pode ser estimado de modo satisfatório, através das equações clássicas válidas para fluidos Newtonianos, bastando para tal associar ao número de Reynolds uma viscosidade efetiva dependente das propriedades reológicas do fluido e da propriedade cinemática do escoamento.

Summer et al. (1989), relataram que um dos problemas do escoamento de lama refere-se a apropriada viscosidade usada em descrever o escoamento, se as partículas finas e a velocidade de sedimentação é baixa, as misturas podem ser testadas viscosimetricamente e seus escoamentos no tubo são

determinados com modelos contínuos. Entretanto, com lamas de partículas maiores, os modelos contínuos conhecidos tornam-se inadequados e faz-se importante determinar o ponto de transição do regime laminar para o turbulento que ainda não foi resolvido satisfatoriamente.

Nakae (1994), realizou um estudo experimental num circuito fechado com o propósito de confirmar a influência dos finos na redução do arraste, afirmando que o fenômeno da redução do arraste tem origem essencialmente na subcamada elástica (localizada entre a subcamada viscosa e o núcleo turbulento). Fez um conjunto de medições com tubo de Pilot numa seção transversal de tubo em acrílico, tentando mostrar a existência desse fenômeno, além de testar o desempenho do tubo de Pilot nos escoamentos com sólidos e traçar o perfil adimensionalizado da distribuição de velocidades. O Pilot, baseado no mesmo princípio do Pilot Cole, tinha seção transversal sextavada e tomadas de pressão, a montante e a jusante em furos localizados nas faces opostas do sextavado. Este Pilot foi acoplado a um transdutor diferencial de pressão que possibilitou ao autor realizar medidas aceitáveis apesar da presença de sólidos. Tal desempenho se deveu ao impedimento do deslocamento do volume de água no interior do tubo que reduziu sobremaneira a penetração de sedimentos no transdutor.

Medições de Velocidades Pontuais

No que concerne a pesquisas experimentais para determinação dos perfis de velocidade de misturas concentradas revisam-se a seguir alguns trabalhos inovadores e recentes para o desenvolvimento de instrumentos de medidas.

Brown et al. (1983), utilizaram uma pequena sonda para obter velocidades pontuais, e empregaram técnicas de correlação-cruzada para medir velocidades médias de misturas com sólidos a altas concentrações de volume de 10, 20 e 30%. A sonda consistiu de um tubo em aço, em forma de tubo de pilot, introduzido com a face do corpo horizontal em sentido contrário ao escoamento. Neste corpo horizontal dois pares de eletrodos devidamente dispostos um ao lado do outro, permitem, após a aplicação de corrente elétrica no escoamento, obter mudanças sensíveis na condutividade. Os autores objetivaram examinar os efeitos da geometria da sonda e qual sua melhor precisão na determinação dos perfis de velocidade ao se configurar sondas com diferentes posições dos eletrodos. Em uma dessas configurações observaram um interessante efeito do número de Reynolds, quando usaram lama de areia com etileno glicol com alta viscosidade, nesta configuração o número de Reynolds do escoamento diminuiu com o aumento da viscosidade da lama e os correlogramas tornaram-se menos definidos.

De forma geral, concluíram que para uma dada geometria da sonda, que pode ter diferentes espaços entre os eletrodos, esta poderá cessar seus efeitos se as partículas forem muito finas, ou seja, para viscosidades elevadas o emprego da sonda é inadequado, devido a região afetada pela sonda ser maior com concentrações elevadas de partículas finas do que para partículas grossas. Entretanto apresentaram-se apropriadas ao estudo de uma variedade de misturas sólido-líquido.

Num trabalho interessante, **Mao-Quan** (1985), desenvolveu um medidor de velocidades com o propósito de determinar o perfil de velocidades em escoamento

turbulento, não somente de água limpa, mas também de fluidos com alta concentração de areia. O medidor consiste basicamente de um transdutor, um conversor e um processador de sinais. O transdutor transforma energia cinética ($1/2 m \cdot V^2$) do escoamento em energia potencial. Este transdutor é composto de um suporte rígido com um grau de liberdade que vibra devido ao escoamento, acoplado a um medidor de deformação (Strain-Gage) de alta sensibilidade. A aparência do medidor assemelha-se ao tubo de Pilot. Mao-Quan (1985) determinou o perfil de velocidade em um canal destacando que o instrumento pode medir a turbulência longitudinalmente de ponto a ponto e a distribuição de velocidades ininterruptamente ao longo do eixo vertical em aproximadamente 30 segundos, com boa exatidão.

ENSAIOS REALIZADOS

Foram ensaiadas concentrações de 2,3,4 e 5% em peso da lama de bentonita e areia em concentrações de 0,75 e 1,5% em peso adicionadas à uma mistura de bentonita em concentração de 3%, na instalação-piloto, após as adaptações de alguns equipamentos existentes no Laboratório de Hidráulica e Recursos Hídricos do Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada (CRHEA). Os elementos que compõem o sistema experimental seguem-se abaixo:

- 1 - Reservatório abastecedor
- 2 - Reservatório gravimétrico
- 3 - Desviador do escoamento
- 4 - Válvula
- 5 - Tubulação de alimentação de água
- 6 - Tubulação em inox p/ retorno e agitação da mistura
- 7 - Bomba centrífuga de 4 cv

- 8 - Mangote de sucção flexível
- 9 - Balança eletrônica
- 10 - Bomba centrífuga de 30 cv
- 11 - Tubo de Pilot
- 12 - Medidor de orifício
- 13 - Tomada de temperatura
- 14 - Sistema de circulação em tubulação de resina e lã de vidro
- 15 - Resistência elétrica
- 16 - Cronômetro digital
- 17 - Interruptor elétrico

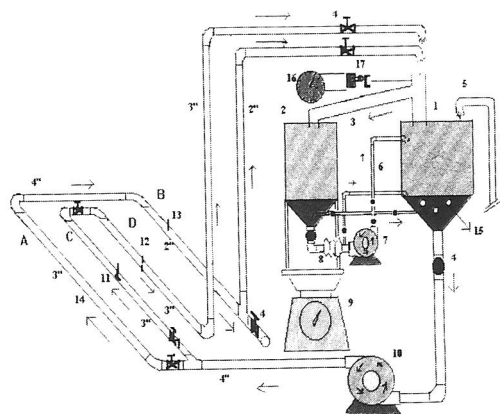


Figura 5 - Representação esquemática da instalação-piloto.

A Mistura

Foi preparada a partir de material muito fino e seco, adquirida em sacas de 25 Kg. As misturas desejadas foram obtidas na proporção adequada diretamente no reservatório abastecedor. Iniciando-se os ensaios com concentração baixa e a medida que terminavam, ajustava-se a concentração já ensaiada, completando a quantidade de bentonita até atingir a concentração planejada.

Perda de Carga Distribuída e Perfis de Velocidade

Para obtenção dos dados de perda de carga distribuída e perfis de velocidade, foram realizados com primeiramente com água limpa, depois com mistura de bentonita e água e por último adicionando areia na mistura de bentonita e água.

Reologia

Para determinação do comportamento reológico da mistura de bentonita-água e de uma equação que fornecesse as propriedades reológicas úteis ao cálculo das equações de perda de carga e perfis de velocidades utilizou-se o viscosímetro RHEOTEST-2.

O viscosímetro RHEOTEST-2 consiste de um cilindro externo que é fixo e um cilindro interno que gira. O cilindro externo fica dentro de um banho termostático onde é regulada sua temperatura e contém a fluido a ser investigado. Nos reômetros rotativos medem-se a resistência do fluido ao movimento (com velocidade constante) rotativo de um dos cilindros. Essa resistência é o torque lido no aparelho, que é transformado em tensão cisalhante. Com os dados obtidos da tensão de cisalhante e do gradiente de velocidades, obtém-se a viscosidade aparente do fluido pela relação:

$$n = \frac{\tau}{\left(\frac{dv}{dy} \right)}$$

Massa Específica

Os ensaios para determinar a massa específica da mistura de bentonita-água foram realizados por picnômetro de 400 ml e picnômetro a gás hélio.

No ensaio com picnômetro de 400 ml, calibrou-se o picnômetro com água, determinando a variação de seu volume com a temperatura. Depois com os dados da massa da mistura bentonita-água calculou-se a massa específica aparente da mistura bentonita-água pela reação da massa da mistura, ($m_{mistura}$) com o seu volume ($V_{mistura}$).

$$\rho = \frac{m_{mistura}}{V_{mistura}}$$

A determinação da massa específica pela técnica da picnometria a gás hélio consiste em injetar gás hélio dentro de um recipiente fechado que contém a amostra a ser investigada. A amostra deverá ser totalmente seca antes do ensaio. O gás hélio preencherá todos os vazios existentes na amostra. Com os dados iniciais da calibração, da massa da amostra, volume do recipiente e da quantidade de gás hélio injetado no recipiente, obteve-se sua massa específica absoluta igual a 2,598 g/cm³ através da relação:

$$\rho = \frac{m_{mistura}}{V_{amostra}}$$

onde,

$$V_{amostra} = V_{cel} - \frac{V_{exp}}{\frac{P_1}{P_2} - 1}$$

Distribuição das Partículas

A análise do tamanho das partículas foi obtida pela técnica de microscopia eletrônica, onde as partículas são medidas diretamente.

Toma-se sua medida linear, por meio de uma escala colocada sobre a imagem da partícula. Foram escolhidas áreas aleatórias da amostra contendo concentrações de partículas de todos os tamanhos e formas.

Os tamanhos obtidos estão representados na tabela 4 abaixo.

Tabela - Diâmetros das partículas de bentonita.

Tamanho (mm)	% Diâmetros
< 10	23,30
10-20	20,00
20-30	21,60
30-40	15,00
40-50	7,00
50-60	1,60
60-70	0,00
70-80	3,30
80-90	5,00
90-100	1,60
> 100	1,60
Total	100,00

As medições de vazão foram realizadas pelo método gravimétrico utilizando equipamentos existentes na instalação-piloto. Foram feitas medidas de perda de carga em dois trechos da instalação-piloto, com tubos de 3 e 2 polegadas de diâmetro, com duas tomadas de pressão em cada tubo e ligadas a um manômetro de mercúrio. Finalizando, mensuraram-se as velocidades pontuais através de um tubo de pilot localizado em uma seção transversal do tubo de 3 polegadas com tomadas de pressão ligadas a um manômetro de mercúrio.

RESULTADOS

Reologia

Os dados obtidos pelo viscosímetro Rheotest-2 mostraram que a curva do escoamento resultante da tensão de cisalhamento em função da temperatura é pseudoplástica ($n < 1$) para a mistura bentonita-

água em todas as concentrações ensaiadas. Como mostra a figura:

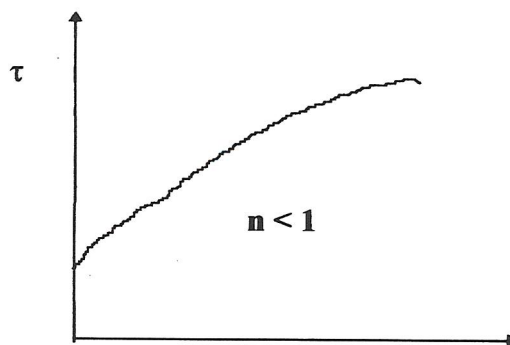


Figura 6 - Reograma da mistura de bentonita-água.

Com os dados das τ e dv/dy em função da temperatura, obtidos com o viscosímetro, dois modelos foram estudados, os quais são:

- O modelo de Bingham (Linear).
- O modelo de Herschell-Bulkley (Não Linear).

O modelo de Bingham representa um comportamento linear mostrando que a partir do momento em que o fluido inicia o escoamento, tem característica de um fluido Newtoniano. Este modelo ajusta dois parâmetros que são: A tensão cisalhante inicial e a viscosidade plástica.

$$\tau = \tau_0 + \mu \left(\frac{dv}{dy} \right)$$

O modelo de Herschell-Bulkley propõe a expressão matemática do modelo da potência deslocada em relação ao eixo das tensões cisalhantes. Ajusta três parâmetros que são: O limite de escoamento, o índice de escoamento e o índice de consistência.

$$\tau = \tau_{HB} + K_{HB} \cdot \left(\frac{dv}{dy} \right)^{n_{HC}}$$

Destes dois modelos o que melhor apresentou coeficiente de determinação (R^2) foi o modelo de Herschell-Bulkley.

Viscosidade Aparente

A partir dos dados de tensão de cisalhamento e gradiente de velocidade para temperaturas de 20 a 60°C, obteve-se, a viscosidade aparente em função do gradiente de velocidade para a mistura de bentonita-água para as concentrações de 2,3,4 e 5 % em peso.

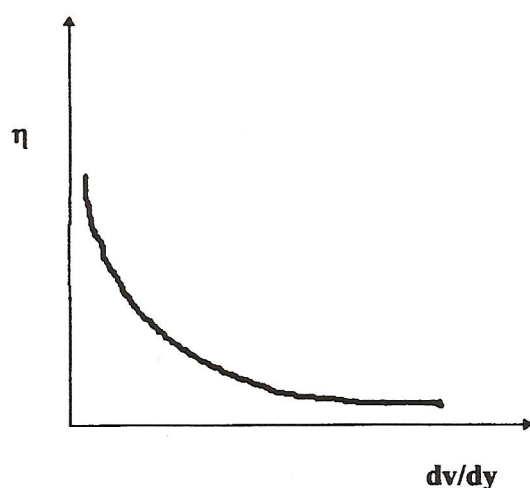


Figura 7 - Curva da viscosidade aparente em função do gradiente de velocidade da mistura de bentonita para concentrações diversas

Observam-se neste gráfico que a viscosidade aparente diminui com o aumento do gradiente de velocidade. Este comportamento repete-se em todas as concentrações ensaiadas, confirmando sua característica pseudoplástica.

Observou-se também, que para altos valores do gradiente de velocidade, a variação da viscosidade aparente com o gradiente de velocidade é similar em todas as temperaturas ensaiadas.

Esta observação, conduz a conclusão que a viscosidade aparente independe da temperatura nessas regiões de gradientes de velocidades elevados.

Massa Específica

Os dados da massa específica foram obtidos em função da temperatura para concentrações de 2, 3, 4 e 5%. Observou-se que o comportamento da mistura de bentonita-água é semelhante ao da água. Os dados para temperaturas acima de 70°C foram desprezados devido a bentonita gerar barreiras físicas de temperatura no picnômetro de 400 ml.

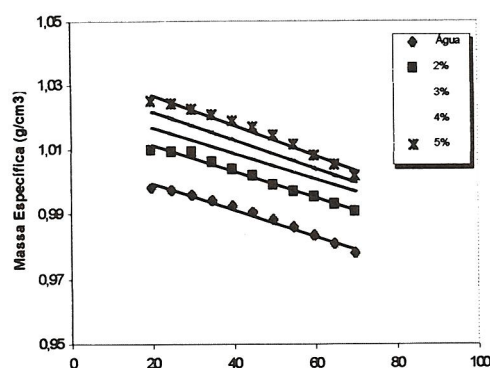


Figura 8 - Massa específica da mistura de bentonita-água em função da temperatura para conc. Constantes.

Viscosidade Cinemática

Com os dados de viscosidade aparente e massa específica em função da temperatura, obteve-se a viscosidade cinemática da mistura de bentonita-água em função da temperatura para concentrações constantes.

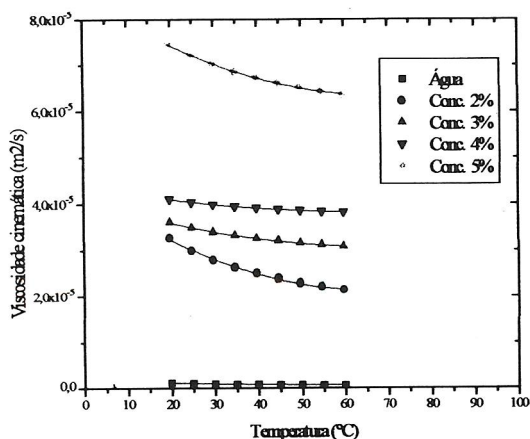


Figura 9 - Viscosidade cinemática da mistura de bentonita-água em função da temperatura para concentrações constantes.

Aplicou-se análise de regressão em todos os dados obtidos para viscosidade aparente, massa específica e viscosidade cinemática, com o objetivo de encontrar equações reológicas úteis aos cálculos de perdas energéticas, especificamente o número de Reynolds generalizado de Metzner-Reed (1955). As equações encontradas apresentam-se nos quadros abaixo.

Tabela 5 - Equações reológicas da viscosidade aparente (η) em função da temperatura T (°C) para concentrações (%) constantes.

Concentração em Peso (%)	Temperatura T (°C)	Viscosidade Aparente (η) $\theta = \frac{T - 20}{60 - 20}$	Coef. de Determinação (R^2)
2,0	20 à 60° C	$\eta = 0,1069 \cdot \theta^{-0,3944}$	0,9127
3,0	“	$\eta = 0,0587 \cdot \theta^{-0,1591}$	0,9271
4,0	“	$\eta = 0,0531 \cdot \theta^{-0,0803}$	0,9223
5,0	“	$\eta = 0,1254 \cdot \theta^{-0,1651}$	0,9532
6,0	“	$\eta = 0,1478 \cdot \theta^{-0,0786}$	0,9010

*Relações válidas para $\theta > 0$

Tabela 6 - Equações para a massa específica, ρ_{mistura} em função da temperatura, T (°C).

Concentração em Peso (%)	Temp. T (°C)	Equação $\theta = \frac{T - 20^{\circ}}{70^{\circ} - 20^{\circ}}$	Coef. de Determinação (R ²)
2%	20 - 70°	$\rho = 1,0196 - 0,0004.\theta$	0,9839
3%	“	$\rho = 1,0249 - 0,0004.\theta$	0,9780
4%	“	$\rho = 1,0307 - 0,0004.\theta$	0,9811
5%	“	$\rho = 1,0365 - 0,0005.\theta$	0,9785

* Reações válidas para $\theta > 0$ Tabela 7 - Equações obtidas para a viscosidade cinemática (ν) em função da temp. (T) °C para conc. const. da mistura de bentonita-água.

Concentração em peso (%)	Temperatura T(°C)	Equação $\theta = \frac{T - 20^{\circ}}{60^{\circ} - 20^{\circ}}$	Coef. de Determinação (R ²)
2,0	20 a 60	$\nu = 1.10^{-4} . \theta^{-0,3799}$	1,0
3,0	“	$\nu = 6.10^{-5} . \theta^{-0,1446}$	0,9980
4,0	“	$\nu = 5.10^{-5} . \theta^{-0,0659}$	0,9988
5,0	“	$\nu = 1.10^{-4} . \theta^{-0,1472}$	0,9996

* Relações válidas para $\theta > 0$

- Perdas de Carga

Os ensaios foram realizados com água e com misturas de bentonita-água nas concentrações de 2, 3, 4 e 5% em peso em tubos de diâmetro de 50 e 75 mm (2 e 3 polegadas). Também ensaiou-se testes com areia em concentrações de 0,75 e 1,5 % adicionadas em uma concentração de 3% em peso da mistura de bentonita-água. Os coeficientes de atrito foram obtidos pela equação de Darcy-Weisbach e algumas indicadas na literatura. Apresenta-se abaixo os resultados obtidos para o ensaio de 4% de concentração em peso.

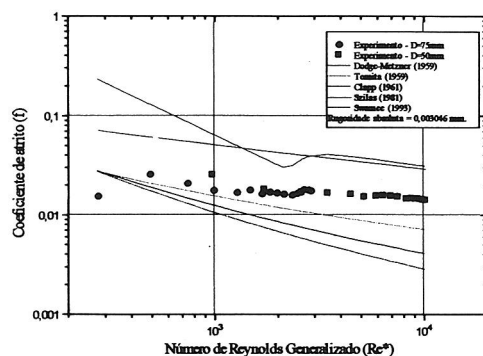


Figura 10 - Coeficiente de atrito (f) em função do número de Reynolds generalizando (Re^*) - Concentração de 4% em peso - Mistura de bentonita e água.

Perfis de Velocidade

As medidas de velocidade pontuais feitas com o tubo de pilot, foram distanciadas uma da outra em 5 mm. Foram ensaiadas misturas de bentonita-água em concentrações de 2, 3 e 4% em peso e areia em concentrações de 0,75 e 1,5 % em peso para uma mistura de bentonita-água em uma concentração de 3% em peso.

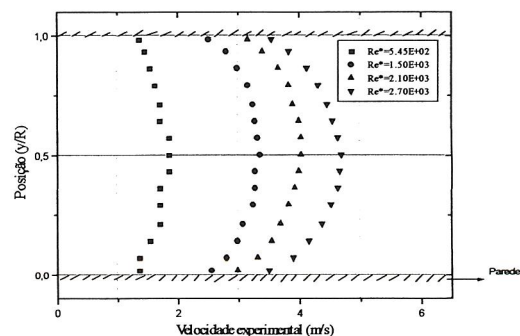


Figura 11 - Perfis de velocidade experimentais para a mistura de bentonita-água a concentração de 4% em peso. Tubo de 75 mm de diâmetro.

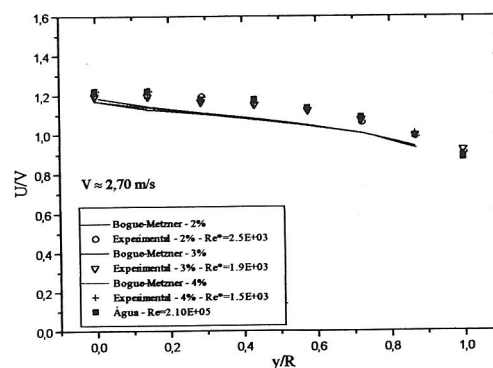


Figura 12 - Comparação entre os perfis de velocidade adimensionais observados e calculados pela equação de Bogue e Metzner (1963).

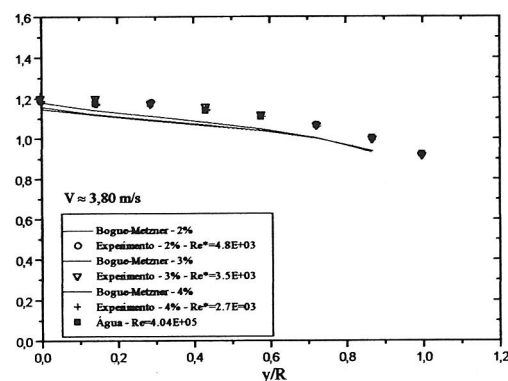


Figura 13 - Comparação entre os perfis de velocidade adimensionais observados e calculados pela equação de Bogue e Metzner (1963).

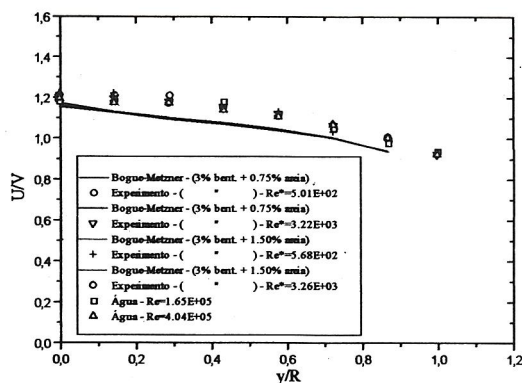


Figura 14 - Comparação entre os perfis de velocidade adimensionais observados e calculados pela equação de Bogue e Metzner (1963).

CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo desenvolver um estudo experimental sobre o escoamento de mistura bentonita-água num duto circular.

A análise dos resultados dos ensaios reológicos mostrou que a mistura bentonita-água tem características não-Newtonianas com comportamento pseudoplástico.

O modelo de Herschell-Bulkley apresentou-se mais adequado para descrever o comportamento da mistura de bentonita-água e para obtenção de sua viscosidade aparente.

Uma comparação entre o fator de atrito observado em escoamento de misturas como função de Rey generalizado e aqueles calculados por diferentes métodos mostra que os dados experimentais se colocam entre as previsões dos modelos de Tomita (1959) e Szilas et al. (1981).

Concluiu-se que esses modelos são mais indicados por apresentarem melhor aproximação do coeficiente de atrito para misturas de bentonita-água.

Os perfis de velocidade adimensionalizados através de velocidade máxima e média com os perfis obtidos das formulações de Brodkey et al. (1961) e Bogue e Metzner (1963), mostraram que o primeiro modelo subestima a velocidade da mistura nas proximidades da parede do duto circular.

O modelo de Bogue e Metzner (1963) aproxima melhor a variação da velocidade longitudinal na seção circular do tubo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BROWN, N. P., SHOOK, C. A. and PETERS, J.; "A Probe For Point Velocities in Slurry Flows"; The Canadian Journal of Chemical Engineering, Vol. 61, August, 1983. Pp. 597-602.
- CHENG, D. C.-H., RAY, D. J. and VALENTIN, F.H.H.; "The Flow Thixotropic Bentonite Suspensions Through Pipes and pipe Fittings"; Trans. Instn. Chem. Engrs., Vol. 43, 1965.
- DORON, P. and BARNEA, D. "Flow Pattern Maps For Solid-Liquid Flow", International Journal of Multifase Flow", Vol. 22, N.2, pp. 273-283.
- GOVIER, G. W. and AZIZ, K., "The Flow of Complex Mixtures in Pipes", Litton Educational Publishing, Inc., 1972.
- LIMA, ^a; "Transporte Hidráulico de Misturas de Bentonita-Água em Condutos Forçados", Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos - Campus da USP, 1996.
- MASSARANI, G. e TELLES, S.A.; "Escoamento de Soluções e Suspensões não-Newtonianas em dutos"; Anais da XX ENEMP, São Carlos, II, 397., 1992.
- MAO-QUAN, T.; "A New Instrument for Turbulent Velocity Measurement", (Wuhan Institute of Hydraulic and Electric Engineering, Wuhan Hubei, P.R. of China), Proceedings International Symposium On Refined Flow Modelling And Turbulence Measurements, ASME September, 1985.

- NAKAE, T.; "*Influência dos Sedimentos Finos na Redução de Arraste em Escoamento de Areia em Conduto Forçado*"; Tese apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Doutor, Vol. 1, 1994, São Paulo.
- SANTANA, C. C., ISMAIL, K. A. R. AND MASSARANI, G., "*Horizontal Hydraulic Transportation of Solid Particles*", Ver. Bras. Tec., V. 10, 1979.
- SANTANA, C. P., COELHO, G. L. V. e CLEMENTE, S. F.; "*Escoamento Turbulento de Suspensões de Minério de Ferro*", Rev. Bras. De Engenharia Química, Vol. 7, nº 3-4, pág. 49-51, Unicamp 1984.
- SILVA, M. G. P., MARTINS, ^aL. M. e OLIVEIRA, A. A. J., "*Avaliação do Comportamento Reológico de Fluidos de Perfuração no Escoamento Anular*"; 2ª. Mesa-Redonda Sobre Revestimento e Cimentação de Poços de Petróleo, Petrobrás, 1988.
- SUMMER, R. J.; SHOOK, C. A.; and ROCO, M. C.; "*Concentration Fluctuation Spectra in Turbulent Slurry Pipeline Flow*", Journal of Fluids Engineering, Vol. 111, Spetember, 1989, pp. 317-323.
- ZANDI, I.; "*Advances in Solid - Liquid Flow in Pipes and Its Application*", Pergamon Press, Inc. 1971.